

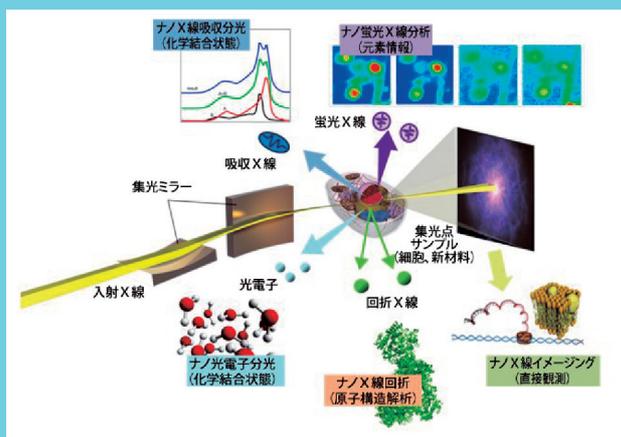
SPring-8 NEWS

50

2010.5

2 研究成果・トピックス

なんと世界最小径！・ナノメートルサイズのX線ビーム誕生
～奇跡の解像力を生み出す驚異の新ビーム～



新ビームで広がる研究の可能性

5 行事報告

第18回SPring-8施設公開
第12回三極ワークショップ

6 SPring-8 Flash

SPring-8を使った研究の受賞情報！

- ・第11回高エネルギー加速器科学研究奨励会 西川賞
- ・日本金属学会金属組織写真賞

SPring-8 News アドレス

<http://www.spring8.or.jp/ja/sp8news>

研 究 成 果 ・ ト ピ ッ ク ス

なんと世界最小径！・ナノメートルサイズのX線ビーム誕生 ～奇跡の解像力を生み出す驚異の新ビーム～

X線自由電子レーザー 開発がきっかけで

SPring-8のサイトにおいてX線自由電子レーザー(XFEL)施設が完成間近です。XFELとは、可視光線のレーザー光と同様に、波長も、光の波の山と山、谷と谷との位置も綺麗に揃った(「位相が揃った」といいます)強力なX線レーザーのことで、現在のSPring-8の放射光の10億倍もの明るさ(輝度が最大値をとる場合を基準にして算定)と、フェムト秒(1000兆分の1秒=光が0.003mmだけ進む時間)レベルの発光時間を持つのがその特性です。SPring-8放射光の硬X線(通常のX線よりずっと波長が短くエネルギーの高いX線)そのものからして明るさは抜群なのですから、そのレーザー光がどれほど強力で輝度が高いかは容易に想像できるでしょう。パルス長(発光時間幅)がフェムト秒レベルなので、光速に近い瞬間的な電子の動きを記録し、詳細に解析することもできると期待されています。このように強力なXFELなのですが、その輝度をもう一段高めたり、様々な応用研究に活用したりするためには、目的に応じてビームを制御する「反射鏡」が必要なのです。

(独)理化学研究所播磨研究所の所長で、XFEL計画推進本部プロジェクトリーダーを務める石川哲也さんらは、高精度の表面加工技術で世界をリードする大阪大学大学院工学研究科の山内和人教授らと共に、XFELのような位相の揃ったX線で用いる反射鏡の精度を予備計測してみました。XFELは建設中のため、予備計測ではSPring-8の中で最も位相の揃った硬X線が使える長大な1kmビームライン(BL29XU)が使用されました。

まずは高性能形状可変 ミラーの開発から

空間的に絞られた強力な線源の発するX線が長い距離を直進すると、ビーム(光線束)の外側部分は拡散しますが、ビーム内側の中心線に近い部分には比較的位相の揃った光線が残ります。その部分だけを取り出し、それまで精度が完璧だと思われていた平面鏡で反射してみると、意外なことにその光像中にスペckルと呼ばれる斑点状の模様が現れたのです。スペckルとは、位相の揃った光の束が鏡面上の各点で拡散反射されたあと、光束をなすそれぞれの光の波に微妙な位相のずれが生じ、互い

にその光度を強め合ったり弱め合ったりする結果起こる現象で、鏡面が完全な平面でないことを物語っています。鏡面の構成分子1個分の凹凸さえも補正できるEEM法(微粒子と加工物表面間の化学反応を用いた超精密平面加工技術)で製作した平面鏡にスペckルが生じた原因は、その鏡面に従来のビームや計測法では識別できない微妙なうねりがあったからなのでした。SPring-8での高精度計測技術とその計測データは大阪大学での加工技術にフィードバックされ、スペckルを生じない平面反射鏡の製作が可能になりました。またその際に開発された計測技術をさらに発展させることにより、このあと述べる回転楕円体面鏡などのような非球面反射鏡の製作が可能になったのです。

超高精度のK-Bミラー を製作

ナノメートルサイズのタンパク質の立体的分子構造、さらにはオングストローム(1000万分の1mm)サイズの水素原子の空間的構造などを直接的に調べるには、それらのサイズと同程度かそれよりもずっと短い波長をもつ明るい光が不可欠です。暗

この記事は、(独)理化学研究所播磨研究所の石川哲也所長にインタビューして構成しました。

い長波長のビームによる探査は、薄明かりの中で、1cm単位が目盛しかない定規を使い、暗い穴の奥にいるアリの足先の細い毛の太さを測るようなものなのです。1kmビームラインの硬X線放射光やXFELの波長は十分に短く透過力も大きいのですが、明るさ(光子密度)だけはもっと高める必要がありました。そこで、石川所長や山内教授らは、新たなミラー製法と鏡面制御技術を用いればその難題を克服できるのではないかと思いついたのです。

ビームの光子密度を高めるには、光線束の口径をなるべく細く絞らなければなりません。凸レンズで太陽光を焦点付近に集

め輝度を高めるのと同様の手法を用いればよいのですが、この研究では凸レンズのかわりにK-Bミラー(カークパトリックバエズ・ミラー)という特殊な反射鏡が使われました。回転楕円体(楕円のグラフをその2つの焦点の位置するX軸を中心にして回転させたときできる立体)の鏡には、片方の焦点から出た光が鏡面で反射され他方の焦点に集まるといった性質があります。K-Bミラー法はその原理を巧みに応用した集光法ですが、実際には完全な回転楕円体の鏡ではなく、曲率の小さな鏡面部だけを切り取った反射鏡2枚のセットが用いられます(図1)。今回特別に開発された全反射型楕円

鏡は、水平方向10cmに対して最凹部でも水平面から数マイクロン(1000分の数mm)程度のへこみしかない、超高精度の長楕円体鏡面をもつ反射鏡でした。焦点同士が大きく離れた長楕円体鏡面のほうが光の拡散が少なくすむからです。それは、世界においても、SPring-8の驚異的な計測技術と大阪大学の神業に近い加工制御技術をもってしか製作できない鏡だったのです。

ついに世界最小径のビーム誕生!

図1のA点(①の回転楕円体鏡面の焦点位置)から入射したビームは①の鏡で反射して縦方向に絞り込まれ、さらに②の鏡で反射して横方向に絞り込まれます。そして、B点(②の回転楕円体鏡面の焦点位置)に、きわめて細く明るいビームとなって集まるわけで、かりに光源点から集光ミラー(図1)のA点までが1km、A点からB点までが10cmだとすると、レンズの公式とほぼ同じ原理でビーム径は10000分の1に絞られます。ところが、10ナノメートルを切るサイズの超高輝度ビームを生み出すにはなお一工夫が要ったのです。1kmビームラインBL29XUの硬X線は世界で最も位相の揃ったビームなのですが、それを直接K-Bミラーに当たった場合、楕円鏡面で発生する微妙な誤差のためわずかに波形が乱れ、いまひとつ十分な絞り込みができません。そこで、0.1ナノメートルの精度で形状を制御できる補正用の形状可変ミラーを開発、それを集光ミラーの前に設置して入射光の位相をあらかじめ補正するようにした結果(図2)、世

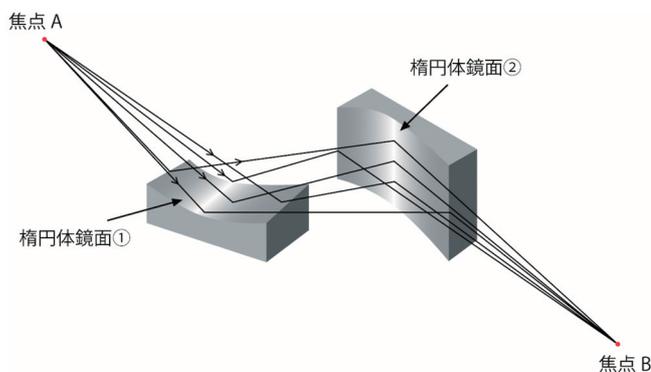
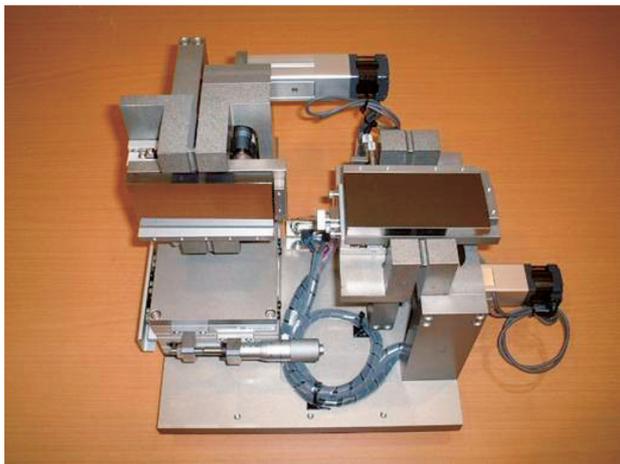


図1. K-Bミラー

楕円体鏡面①の焦点Aから入射したビームは①の鏡で反射して縦に絞り込まれ、さらに楕円体鏡面②で反射して横に絞り込まれる。そして最終的に②の焦点Bに集まる。

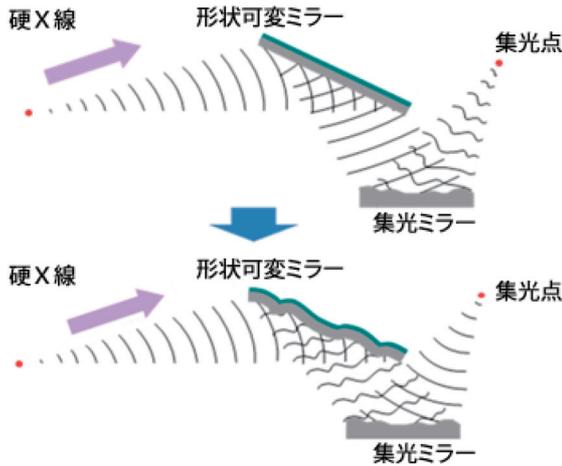


図2. 形状可変ミラーの役割と同ミラーによるX線ナノビームの形成過程
集光ミラーの発生する誤差を形状可変ミラーの鏡面を状況に応じて微妙に変形させることにより補正する。

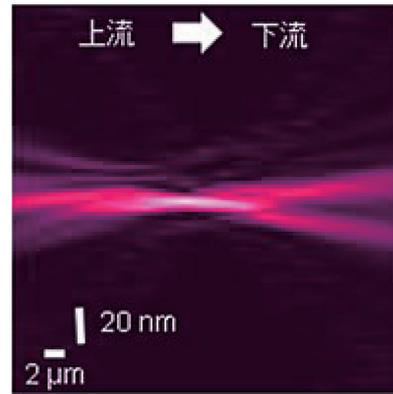


図3. 構築したX線集光光学系で実現したX線ナノビーム
世界で初めて10ナノメートルを突破、7ナノメートルサイズのX線ビームを実現した。上図は補正後の集光点（図1のB点に相当）付近のビームの強度分布を表している。

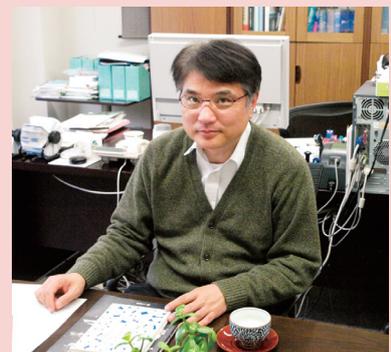
界で初めて7ナノメートル径という回折限界（光を狭い領域に集める際の理論的限界）に近い高輝度X線ビームをつくることに成功したのです（図3）。XFELとこの集光技術とを組み合わせると超高輝度ビームをつくれれば、

ナノメートルレベルの分解能（識別能力）を持ち、分子・原子の立体構造を直接観察できるX線顕微鏡の開発も可能です。石川所長は、「もう1桁ビームを小さく絞り込めれば、真空を破壊し電子と陽電子とを発生させる

ことができるかもしれません。電子と陽電子がぶつかると光を発生して消滅しますが、その逆の現象を起こそうというわけですね」と、その夢を語っています。

column コラム 光科学の根幹を支える探究心

自然環境の豊かな伊豆半島で育った石川哲也さんは、好奇心旺盛な少年だったそうです。高校時代、地球物理学者だった故竹内均さんの講話に触発されて波動現象などに興味を持ち、東大の応用物理学科に進みました。「他の講義は容易に理解できましたが、当時の私には、複雑かつ高度な光の諸現象を説明する波動関数だけは難解でした。そこで、一念発起して波動関数やそれと深く関わる光科学の研究に踏み込むことになったのです」と石川さんは語っています。難解な世界だからこそ、真正面からそれに挑む——学者としてのそんな信条のようなものを、石川さんの穏やかな風貌の奥に一瞬私は垣間見る思いでした。東京大学助教授のポストを離れSPring-8に移ったのも、常に最先端の研究現場に身を置き、世界をリードする仕事をしたいという情熱からだったのでしょう。「光科学の根幹となる『良質な光』を生み出すことさえできれば、応用研究のほうは自然に進むものです。私はいまそんな光づくりに専念しています。日々新たな進展がある光科学は決して古くなることなどありません」と話す石川さんの瞳は、少年のそれのようにきらきらと輝いていました。「論文を読む時はそこに書いていないことを読むものなんだよ、と若い連中には言っています」という最後の言葉も、実に示唆に富んでいて印象的でした。



取材・文：本田 成親

行事報告

第18回SPring-8施設公開

第18回SPring-8施設公開を4月29日（木・昭和の日）に開催いたしました。この施設公開は、科学技術週間にちなんで毎年行われています。今年は快晴と天候にも恵まれ、また兵庫県のスプリングフェアが同日に開催されたこともあり、4,281名の皆様にご来場いただきました。これは昨年よりも643名多く、最高入場者数を刷新しました。

イベントは、各施設の見学、加速器や実験ホールの見学ツアー、工作教室などの体験実習、パネル展示などが行われました。体験実習では、小中学生の方々を中心として熱心にご参加いただきました。また、科学講演会では横浜市立大学の朴三用先生による「インフルエンザウイルスへの挑戦」、大阪府立大学の牧浦理恵先生による「Small is better? ナノテクで安全・高性能なバッテリーへ道」、江崎グリコ(株)の田中智子氏による「ガムで歯の健康に迫る～むし歯の無い社会の実現に向けて～」、東京工業大学の細野秀雄先生による「セメントを透明半導体、金属、そして超伝導体に変身させる」と題した4つの講演が午前、午後2

回ずつ行われ、どれも私たちの生活に関係する内容だけに、多くの方々に興味深く聞いていただきました。

主催者といたしまして、無事に施設公開が開催できましたことをうれしく思っています。そして、今後も引き続き、魅力ある施設公開になるよう努力いたします。皆様のまたのご来場をお待ちしています。

(広報室)



第12回三極ワークショップ

第12回三極ワークショップが、2010年4月12日から14日にSPring-8放射光普及棟にて開催されました。本ワークショップは、世界に3つある大型放射光施設である、ESRF（フランス：欧州18カ国が共同で建設）、APS（米国）、そしてSPring-8（日本）が、施設間の協力と情報交換のために1、2年ごとに定期的に開催しています。ホストは各施設の持ち回りで、今回はSPring-8での開催となりました。加えて今回は、昨年11月に運転を開始した4つめの大型放射光施設であるPETRA III（ドイツ）からの出席者を迎えました。海外から38名、SPring-8関係者138名の総勢176名が参加しました。

会議では、各施設の現状および研究成果が報告され、将来の性能向上や改造についても施設ごとに特色ある計画が紹介されました。SPring-8からは、石川哲也 理研播磨研究所長が、X線自由電子レーザーと性能アップした次期SPring-8 II とを適材適所で用いることで、放射光科学の可能性を拡大させる計画を述べました。加速器、X線光学素子、検出器、産業利用、ユーザー支援など個々のテーマについても活発な議論が行われ、施設間での協力体制や共同研究の方針を改めて確認しました。次回のワークショップは、2011年秋にフランスで行われる予定です。

(利用研究促進部門)



S P r i n g - 8 F l a s h

SPring-8を使った研究の受賞情報！

第11回高エネルギー加速器科学研究奨励会 西川賞

西川賞は、高エネルギー加速器ならびに加速器利用に関わる実験装置の研究において、獨創性に優れた国際的に評価の高い業績をあげた研究者に贈られるものです。

受賞者：富澤 宏光 財団法人高輝度光科学研究センター 加速器部門
副主幹研究員

受賞内容：「高輝度フォトカソード電子銃のための高品質レーザー光学システム」

富澤研究員（写真前段左から2番目）は、SPring-8をはじめとする放射光加速器の電子ビームの高輝度化を目的として、フォトカソード（光陰極）電子銃の実現に取り組んできました。フォトカソードに照射するレーザーパルスの3次元形状を最適化する要素技術をそのリアルタイム計測技術とともに開発し、世界に先駆けてシステムとして完成させました。さらに年間を通じてレーザーシステムを安定に運転することを可能にした恒温恒湿クリーンルーム（環境試験室）と各種温調プレートの開発により、本技術を実用レベルにまで完成させました。現在、このSPring-8で開発された電子銃光源レーザーの整形技術は世界の標準的な整形システムになっています。この成果は、将来の放射光加速器に求められる、電子ビームの高輝度化と超短パルス化に大きく貢献するものと注目されています。

授賞式は3月3日に東京都内のアルカディア市ヶ谷にて行われました。（加速器部門）



日本金属学会金属組織写真賞

金属組織写真賞は試料・方法・結果などにオリジナリティーがあり、特に高い学術的価値が認められる金属組織写真に対して授与される賞です。

受賞者：小嗣 真人 財団法人高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門
研究員
三俣 千春 東北大学 工学研究科 客員教授

受賞内容：「光電子顕微鏡による鉄隕石の金属組織と磁区構造の観察」

小嗣研究員と三俣客員教授は、長らく未解明であった鉄隕石の磁気特性を、物質科学の観点からメカニズムを解明しました。研究チームは大型放射光施設SPring-8の軟X線固体分光ビームライン（BL25SU）と磁性材料ビームライン（BL39XU）に接続された光電子顕微鏡を用いて、ナノスケールの磁区構造解析を直接的に行った結果、テトラターナイト（L10型鉄ニッケル規則合金）と呼ばれる鉄隕石特有の鉄ニッケル相に起源することを結論づけました。本研究により見出されたテトラターナイト相の磁気特性は、省資源・低消費電力の次世代磁気メモリの材料として注目されつつあり、我が国の低炭素社会の実現に繋がるものと期待されます。授賞式は3月28日に筑波大学で行われました。

なお、本作は国際大会であるInternational Metallographic Contest に推薦されます。（利用研究促進部門）



SPring-8Newsの感想をお聞かせください！

SPring-8Newsでは「読者アンケート」を実施しています。

<http://www.spring8.or.jp/ja/support/download/publication/news/feedback/>
SPring-8Newsで今後取り上げてほしい内容や、感想など皆様のご意見をお待ちしております。

施設見学の申し込み方法

見学のお申し込みについては、電話で広報室までお問い合わせください。また、以下ホームページからもお申し込みいただけます。

(財)高輝度光科学研究センター 広報室
電話番号：0791-58-2785
ファックス番号：0791-582786

URL:http://www.spring8.or.jp/ja/support/contact/site_tour/



SPring-8 News
No.50 2010.5発行

SPring-8 Newsはホームページにも掲載されています。

<http://www.spring8.or.jp/>

編集 SPring-8 News 編集委員会

発行 財団法人 高輝度光科学研究センター

Japan Synchrotron Radiation Research Institute
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1丁目1番1号
TEL (0791)58-2785 FAX (0791)58-2786 E-mail:kouhou@spring8.or.jp